

Anna Selerowicz\*

orcid.org/0009-0002-6493-8084

## Obrazowanie hiperspektralne (HSI) w diagnostyce dzieł sztuki. Pogotowie Konserwatorskie w służbie zabytków

### Hyperspectral Imaging (HSI) in the Diagnosis of Works of Art: The Conservation Emergency Unit in the Service of Monuments

**Słowa kluczowe:** obrazowanie hiperspektralne (HSI), reflektografia w podczerwieni 900–2500 nm, badania nieniszczące, spektroskopia w podczerwieni, analiza *in situ*, mobilne laboratorium

**Keywords:** hyperspectral imaging (HSI), 900–2500 nm infrared reflectography, nondestructive analysis, infrared spectroscopy, *in situ* analysis, portable laboratory

#### Wprowadzenie

Badania nieniszczące i nieinwazyjne stały się w obecnych czasach niezastąpionym źródłem informacji o analizowanych obiektach bez konieczności jakiegokolwiek, nawet najmniejszej szkodliwej ingerencji w oryginalną substancję zabytkową. Szereg aparatury laboratoryjnej dostępny jest obecnie również w postaci przenośnych urządzeń, umożliwiając naukowcom i konserwatorom przeprowadzenie niezbędnych badań *in situ* przy obiekcie, często nawet w trudnych warunkach terenowych. Wykorzystany w ten sposób ogromny potencjał technologiczny otwiera nowe pole do badań zabytków pozbawionych do tej pory możliwości pełniejszego naukowego poznania na skutek ograniczeń w przenoszeniu obiektów lub oczywistego nieruchomego charakteru zabytków mniejszej czy większej architektury.

Wśród nieinwazyjnych technik analitycznych używanych do oceny dzieł sztuki znalazło się również obrazowanie hiperspektralne (HSI, ang. *Hyperspectral Imaging*). Początkowo stworzone do celów wojskowych i badań kosmicznych, zostało następnie wdrożone do innych dziedzin, jak przemysł, farmaceutyka czy

#### Introduction

Non-destructive and non-invasive analysis have currently become an indispensable source of information about examined objects without the need for any, even the slightest, harmful interference with the original historic substance. A range of laboratory equipment is now also available in the form of portable devices, enabling scientists and conservators to carry out the necessary research *in situ* directly on the object, often even in difficult field conditions. The tremendous technological potential thus exploited opens up a new field for the study of monuments deprived until now of the possibility of fuller scientific understanding as a result of restrictions on moving examined objects or the obvious immovable nature of monuments of both historic monuments and buildings.

Hyperspectral imaging (HSI) has emerged among the non-invasive analytical techniques used to evaluate works of art. Initially developed for military and space research purposes, it was later deployed in other fields, such as industry, pharmaceuticals and agriculture. The potential of the new technology was also recognized by

\* mgr, Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie, Międzyuczelniany Instytut Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki

\* M.A., Academy of Fine Arts in Warsaw, The Inter-Academy Institute of Conservation and Restoration of Works of Art

**Cytowanie / Citation:** Selerowicz A. Hyperspectral Imaging (Hsi) in the Diagnosis of Works of Art: The Conservation Emergency Unit in the Service of Monuments. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2024, 80:

**Otrzymano / Received:** 26.06.2024 • **Zaakceptowano / Accepted:** 24.10.24

**doi:** 10.48234/WK80HYPERSPETRAL

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews



Ryc. 1. Stanowisko badawcze do badań HSI w laboratorium Pogotowia Konserwatorskiego w Warszawie [a] i w trakcie sesji pomiarowej *in situ* w pomieszczeniach ekspozycyjnych Muzeum Zamek Królewski w Warszawie [c] wraz z modelem kamery hiperspektralnej będącej na wyposażeniu PK [b]; [a, c] fot. P. Zambrzycki, [b] karta techniczna produktu [Hyperspectral at Scale].

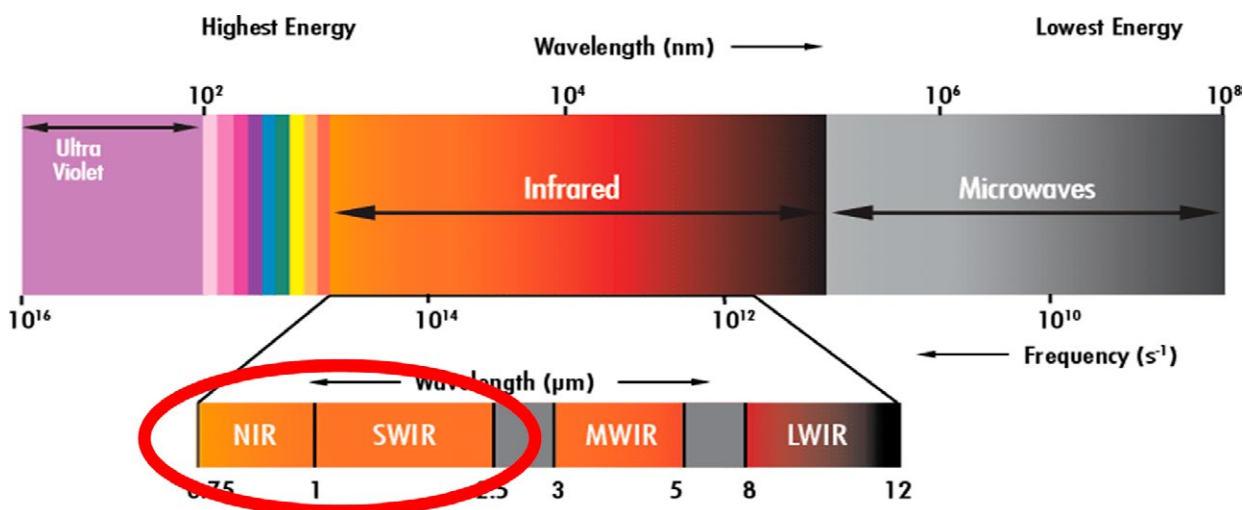
Fig. 1. HSI research set in The Conservation Emergency Unit in Warsaw [a] and during an *in situ* examination session in the exhibition rooms of the Royal Castle Museum in Warsaw [c], along with a model of the hyperspectral camera in the CEU inventory [b]; [a, c] photo by P. Zambrzycki, [b] product technical sheet [Hyperspectral at Scale].

rolnictwo. Potencjał nowej technologii docenili także konserwatorzy, znajdując dla niej zupełnie nowe przeznaczenie. Prototypowe pierwotnie urządzenia stały się powszechnie dostępne dopiero w latach 90. [Goetz et al. 1985, s. 1147–1153], pozwalając na sprawdzenie możliwych zastosowań spektroskopii w podczerwieni w badaniach dzieł sztuki.

Działanie kamery hiperspektralnej opiera się na zasadach reflektografii w podczerwieni (IRR) i technik obrazowania. W wyniku rejestracji otrzymujemy skan w postaci obrazu w skali szarości wraz z danymi spektralnymi. Ze względu na liczbę możliwych do zapisania pasm widmowych rozróżnia się kilka systemów: wielopasmowe, multi- i hiperspektralne. Najwięcej danych dostarcza ostatni z wymienionych, rejestrując setki obrazów spektralnych o szerokości pasmowej mniejszej lub równej 10 nm [Cucci, Casini 2020, s. 586].

conservators, who have found an entirely new application for it. Originally prototype devices became widely available only in the 1990s [Goetz et al. 1985, pp. 1147–1153], allowing possible applications of infrared spectroscopy in the study of works of art to be tested.

The hyperspectral camera operates based on the principles of infrared reflectography (IRR) and imaging techniques. The final effect of the capturing process is a scan in the form of a grayscale image enhanced with spectral data. Due to the number of spectral bands that can be recorded, a distinction is made between several imaging systems: multibands, multispectral and hyperspectral. The latter provides the most data, recording hundreds of spectral images with bandwidths less than or equal to 10 nm [Cucci, Casini 2020, p. 586]. The hyperspectral camera from Headwall Photonics, which is at the disposal of The Conservation Emergency Unit



Ryc. 2. Schemat obrazujący spektrum elektromagnetyczne z wyszczególnionym na czerwono zakresem działania kamery hiperspektralnej w Pogotowiu Konserwatorskim; [What is SWIR?].

Fig. 2. Diagram showing the electromagnetic spectrum with the range of the hyperspectral camera in The Conservation Emergency Unit listed in red; [What is SWIR?].

Kamera hiperspektralna firmy Headwall Photonics, znajdująca się na wyposażeniu laboratorium Pogotowia Konserwatorskiego w Warszawie (PK), znajduje szerokie zastosowanie do nieniszczących badań obiektów wykonanych z różnych materiałów zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i in situ, w terenie. Wyposażona dodatkowo w mobilny statyw typu gimbal, umożliwia prowadzenie analiz w miejscu przechowywania/zlokalizowania obiektów, których transport do badań stacjonarnych jest z różnych względów utrudniony lub niemożliwy (ryc. 1).

### Metodologia

Analiza dzieł sztuki z zastosowaniem reflektografii w podczerwieni (IRR) polega na oświetleniu badanego obiektu źródłem światła generującym promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR, SWIR). Część padającego promieniowania ulega rozproszeniu, pozostała zaś część zostaje odbita od powierzchni. Dzięki użyciu kamery wyposażonej w specjalny detektor możliwa jest rejestracja odbitego od obiektu promieniowania w postaci tzw. reflektogramów podczerwieni, a następnie przekonwertowanie danych na formę cyfrową z możliwością dalszej obróbki w specjalistycznych programach komputerowych.

Kamera hiperspektralna Headwall charakteryzuje się zakresem badawczym w przedziale 900–2500 nm. Przyjmuje się, że obejmuje on tzw. bliską podczerwień 750–1000 nm (NIR, ang. *near infrared*) i podczerwień krótkofalową 1000–2500 nm (SWIR, ang. *short wave infrared*) (ryc. 2).

Stopień przenikania promieniowania podczerwonego najlepiej chyba obrazują obiekty polichromowane. W odróżnieniu od komplementarnych technik analitycznych, wykorzystujących poszczególne obszary spektrum elektromagnetycznego (jak luminescencja

w Warszawie (CEU), is widely used for non-destructive analysis of objects made of various materials both in laboratory conditions and in situ, in the field. The camera is additionally equipped with a portable gimbal-type tripod, which enables analyses at the storage/location of examined objects, the transportation of which for stationary examinations is difficult or impossible for various reasons (Fig. 1).

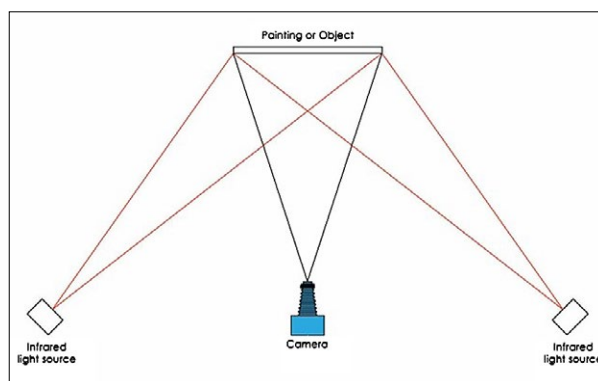
### Methodology

Analysis of works of art with the use of infrared reflectography (IRR) involves illuminating the examined object with a light source that generates radiation in the near-infrared (NIR, SWIR) range. Part of the incident radiation is scattered, while the rest is reflected from the surface. Thanks to the use of camera equipped with a special detector, it is possible to record the radiation reflected from the object in the form of so-called infrared reflectograms, and then convert the data into digital form with the possibility of further processing in dedicated computer software.

The Headwall hyperspectral camera has an examination range of 900–2500 nm. It is assumed to include the so-called *near infrared* 750–1000 nm (NIR) and *short wave infrared* 1000–2500 nm (SWIR) (Fig. 2).

The degree of penetration of infrared light is perhaps best illustrated by objects covered with polychromic layers. Unlike complementary analytical techniques that use particular areas of the electromagnetic spectrum (such as luminescence in the ultraviolet light, infrared photography or X-ray radiography), the hyperspectral imaging allows penetration through the top layers of paint (transparent to IR radiation), blocked at highly reflective layers of ground or mortar (Fig. 2b). Consequently, it allows to overcome the obstacles like varnishes, paint layers or distortions coming from the support itself<sup>1</sup>.





Ryc. 3. Przykładowe stanowisko badawcze HSI w trakcie sesji terenowej [a] wraz ze schematem elementów składowych aparatury [b]; [a] fot. P. Zambrzycki, [b] [Introduction to Infrared Reflectography].

Fig. 3. An example of an HSI research site during a field session [a] with a diagram of the equipment components [b]; [a] photo by P. Zambrzycki, [b] [Introduction to Infrared Reflectography].

w ultrafiolecie, fotografia w podczerwieni czy rentgenografia), metoda obrazowania hiperspektralnego umożliwia przeniknięcie przez wierzchnie warstwy malarskie (transparentne dla promieniowania IR), zatrzymując się na silnie odbijających warstwach gruntu czy zaprawy (ryc. 2b). W konsekwencji pozwala na pokonanie blokady w postaci werniksów, malatury czy zniekształceń pochodzących od samego podłoża<sup>1</sup>.

Technika obrazowania hiperspektralnego wymaga odpowiedniego zestawu aparaturowego, zaprojektowanego do rejestracji i analizy danych zebranych z szerokiego przedziału spektrum elektromagnetycznego (ryc. 3). Podstawowe stanowisko badawcze składa się z kamery hiperspektralnej (urządzenia detekcyjnego), źródła światła, komputera połączonego z detektorem i wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie oraz obiektu badań.

W zależności od celu badawczego i możliwości technicznych dostępnej aparatury dodatkowo wykorzystywane są także np. wzorce jakości obrazu czy też referencyjne bazy danych.

W trakcie badań kamerą hiperspektralną w Pogotowiu Konserwatorskim wykorzystywany jest mobilny zestaw oświetlenia typu S DISON Quartz lamp HD 1000, składający się z 2 reflektorów o łącznej mocy 2000 W i temperaturze barwowej 3200 K. Oświetlenie to pozbawione jest emisji promieniowania ultrafioletowego. W przypadku obiektów szczególnie wrażliwych na nawet najmniejsze zmiany temperatury należy jednak brać pod uwagę obecność oddziaływania termicznego pochodzącego z lamp halogenowych.

Przewagę techniki HSI nad innymi metodami identyfikacyjnymi stanowi możliwość bardzo szybkiego uzyskania wstępnego kompletu informacji z szerokiego pasma promieniowania podczerwonego w postaci skanu widocznego niemal od razu na ekranie monitora (proces skanowania można obserwować w czasie rzeczywistym). Rejestracja pojedynczego fragmentu obiektu, którego wymiary zdeterminowane są przez parametry urządzenia, trwa jedynie kilka sekund. W przypadku prowadzenia kompleksowych badań, mających na celu zeskanowanie i ewentualne mozaikowe zestawienie rejestracji

The hyperspectral imaging technique requires a suitable equipment set, designed to record and analyze data collected from a wide range of the electromagnetic spectrum (Fig. 3). A basic research site consists of a hyperspectral camera (detection device), a light source, a computer connected to the detector and equipped with appropriate software, and a test object itself.

Depending on the research goals and the technical capabilities of the available equipment, quality standards or reference databases are also used. During hyperspectral camera analysis conducted in The Conservation Emergency Unit, a portable lighting set of S DISON Quartz lamps HD 1000, consisting of two spotlights with a total power of 2000 W and a color temperature of 3200 K, is used. This lighting is devoid of ultraviolet emissions. However, for objects particularly sensitive to even the slightest changes in temperature, the presence of thermal effects from halogen lamps should be taken into consideration.

The advantage of the HSI technique over other identification methods is the ability to obtain very quickly an initial set of information from a wide range of infrared radiation in the form of a scan visible almost immediately on the monitor screen (the scanning process can be observed in real time). Capture of a single fragment of an object, the dimensions of which are determined by the parameters of the device, takes only a few seconds. In case of conducting complex research, aimed at scanning and possibly obtaining mosaic compilation of entire examined object, processing time increases in proportion to the size of the analyzed work of art and the number of scans needed to visualize the total. Cooling of the hyperspectral camera is necessary to minimize interference during long data acquisition process [Saunders et al. 2000, pp. 170–176].

Depending on the scope of use of the HSI method, the results provide information on the entire surface or a preset area, as well as allow the selection of fragments for further study (e.g., taking material samples for microchemical or cross-section analysis).



Ryc. 4. Fragment obrazu temperowego na desce *Matka Boska Opolska* (ok. 1480, Czechy); obiekt z Muzeum Diecezjalnego w Opolu; zestawienie fotografii w świetle widzialnym [a] z reflektogramem w podczerwieni przy długości fali 1800 nm [b]; obrazowanie hiperspektralne umożliwiło wykrycie bardzo wyraźnego rysunku wstępnego i zmian kompozycyjnych w niektórych obszarach obrazu; [a] fot. R. Stasiuk, [b] fot. A. Selerowicz.

*Fig. 4. Fragment of a tempera painting on panel support of Holy Mother of Opole (ca. 1480, Czech Republic); painting from the Diocesan Museum in Opole; comparison between visible-light photography [a] and infrared reflectogram at 1800 nm [b]; hyperspectral imaging enabled detection of a very distinctive preliminary drawing and compositional changes in some areas of the painting; [a] photo by R. Stasiuk, [b] photo by A. Selerowicz.*



Ryc. 5. Fragment obrazu temperowego na desce *Oplakiwanie Chrystusa wraz z donatorem* (XVI w., Śląsk); obiekt z Muzeum Diecezjalnego w Opolu; zestawienie fotografii w świetle widzialnym [a] z reflektogramem w podczerwieni przy długości fali 2200 nm [b]; widoczne są znaczące zmiany kompozycyjne w rysunku wstępnym, szczególnie w części centralnej; [a] fot. R. Stasiuk, [b] fot. A. Selerowicz.

*Fig. 5. Fragment of a tempera panel painting The Mourning of Christ with a donor (sixteenth century, Silesia); object from the Diocesan Museum in Opole; comparison between a photograph in visible light [a] and an infrared reflectogram at 2200 nm [b]; significant compositional changes are visible in the preliminary drawing, especially in the central part; [a] photo by R. Stasiuk, [b] photo by A. Selerowicz.*





Ryc. 6. Fragment obrazu temperowego na desce *Scena Ukrzyżowania wraz z donatorami* (1557, Niemcy); obiekt z Muzeum Diecezjalnego w Opolu; zestawienie fotografii w świetle widzialnym [a] z reflektogramem w podczerwieni przy długości fali 1100 nm [b]; analiza wyników badań wskazuje na późniejsze powstanie herbów, naniesionych na namalowaną wcześniej kompozycję; [a] fot. R. Stasiuk, [b] fot. A. Selerowicz.

Fig. 6. Fragment of a tempera panel painting *Scene of the Crucifixion with donors* (1557, Germany); painting from the Diocesan Museum in Opole; comparison between a photograph in visible light [a] and an infrared reflectogram at 1100 nm [b]; analysis of the results indicates the later creation of the coats of arms, applied to the previously painted composition; [a] photo by R. Stasiuk, [b] photo by A. Selerowicz.

całego obiektu, czas ten wydłuża się proporcjonalnie do wielkości analizowanego dzieła i potrzebnej do zobrazowania całości liczby skanów. W celu zniwelowania zakłóceń podczas długotrwałego procesu uzyskiwania danych konieczne jest chłodzenie kamery hiperspektralnej [Saunders et al. 2000, s. 170–176].

W zależności od zakresu użycia metody HSI wyniki pozwalają na uzyskanie informacji na temat całej powierzchni lub też zadanego obszaru, a także umożliwiają wytypowanie miejsc do dalszych badań (np. pobrania próbek materiałowych do analiz mikrochemicznych czy stratygraficznych).

### Zastosowanie

Obrazowanie z użyciem kamery hiperspektralnej znajduje szerokie zastosowanie zwłaszcza do analizy obiektów polichromowanych, umożliwiając uzyskanie wielu informacji niewidocznych gołym okiem. Szczególnie interesujące rezultaty przynoszą badania malarstwa sztalugowego i malarstwa na drewnie. Ocena wyników pomiarów pozwala m.in. na:

- wykrycie obecności rysunku przygotowawczego, wykonanego ciemną kredką czy farbą, a także twardym rysikiem lub puncą (ryc. 4);
- ocenę zmian kompozycyjnych zarówno autorskich (ryc. 5) na etapie powstawania dzieła, jak i w późniejszym czasie (ryc. 6);
- uwidocznienie ewentualnej obecności *pentimenti*;
- wieloaspektową analizę stanu zachowania obiektu;
- detekcję przemałowań oraz ich zasięgu i charakteru;

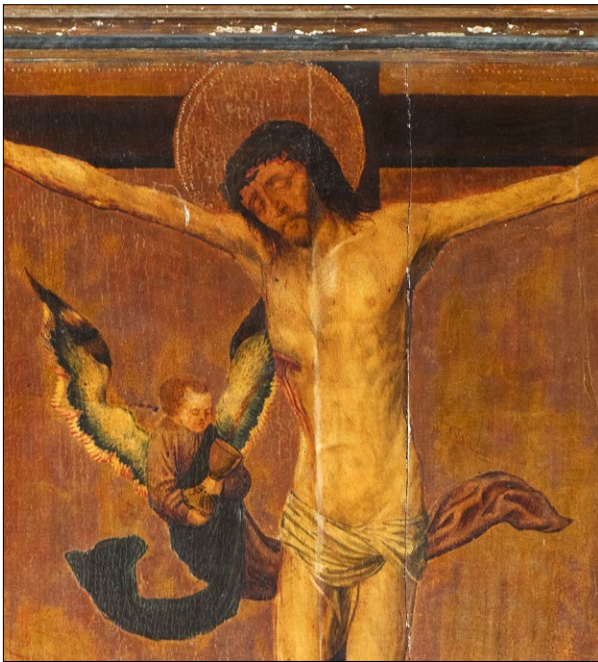
### Application

Hyperspectral imaging is widely used, especially for the analysis of polychromed objects, making it possible to obtain a lot of information invisible to the naked eye. Particularly interesting results come from the study of easel paintings and paintings on wood panels. Evaluations of the measurements allow, among other things:

- detecting the presence of a preparatory drawing, made with a dark crayon or paint, as well as a hard stylus or punch (Fig. 4);
- evaluation of compositional changes both of original character (Fig. 5), while preparing the painting and done in the future (Fig. 6);
- highlighting the possible presence of *pentimenti*;
- comprehensive analysis of the object's state of preservation;
- detection of repaintings and their extent and nature;
- visualizing the type of fillings;
- determining the extent of retouchings;
- depicting signatures that are invisible or hidden under upper layers;
- identifying forgeries;
- analysis of the artist's painting technique (Fig. 7);
- to authenticate or detect invisible inscriptions (Fig. 8);
- analyzing the pigments and materials used.

Hyperspectral camera analysis also enables monitoring the state of preservation of objects during ongoing conservation treatments, such as cleaning surfaces of secondary layers.

Unlike techniques using other intervals of the electromagnetic spectrum, hyperspectral imaging allows



Ryc. 7. Fragment obrazu temperowego na desce *Scena Ukrzyżowania wraz z donatorami* (1557, Niemcy); obiekt z Muzeum Diecezjalnego w Opolu; zestawienie fotografii w świetle widzialnym [a] z reflektogramem w podczerwieni przy długości fali 2100 nm [b]; wraz ze wzrostem długości fali promieniowania IR i zwiększoną transparentnością warstwy malarskiej nastąpiło uwidocznienie się granic płatków złocień użytych w tle obrazu; [a] fot. R. Stasiuk, [b] fot. A. Selerowicz.

Fig. 7. Fragment of *Scene of the Crucifixion with donors*, tempera painting on panel (1557, Germany); object from the Diocesan Museum in Opole; comparison between visible light photography [a] and infrared reflectogram at 2100 nm [b]; as the wavelength of IR radiation increased and the transparency of the painting layer also increased, the edges of the gilt flakes used in the background of the painting became visible; [a] photo by R. Stasiuk, [b] photo by A. Selerowicz.

- zobrazowanie rodzaju uzupełnień;
- określenie zakresu retuszy;
- zobrazowanie niewidocznych lub ukrytych pod nawarstwieniami sygnatur;
- rozpoznanie fałszerstw;
- analizę techniki malarskiej artysty (ryc. 7);
- uczytelnienie lub wykrycie niewidocznych napisów (ryc. 8);
- analizę użytych pigmentów i materiałów.

Analiza z wykorzystaniem kamery hiperspektralnej umożliwia również monitorowanie stanu zachowania obiektów w trakcie prowadzonych zabiegów konserwatorskich, np. oczyszczanie powierzchni z wtórnych nawarstwień.

W przeciwieństwie do technik wykorzystujących pozostałe przedziały spektrum elektromagnetycznego obrazowanie hiperspektralne pozwala na przeniknięcie przez wierzchnie warstwy malarskie przy ich jednoczesnej analizie i na ocenę kompozycji znajdującej się poniżej<sup>2</sup>. W wyniku badania otrzymujemy serię obrazów w skali szarości, skompresowanych w formie pojedynczego pliku. Analiza danych wymaga specjalistycznego oprogramowania, które również pozwala na obserwację wyników w tzw. fałszywych kolorach (FC, ang. *false colours*) (ryc. 9).

Bardzo szeroki zakres rejestracyjny kamery hiperspektralnej w Pogotowiu Konserwatorskim (900–2500 nm) umożliwia niespotykaną dotąd formę obrazowania i detekcji przez jedno urządzenie. Według dostępnej literatury jako najbardziej interesujący do

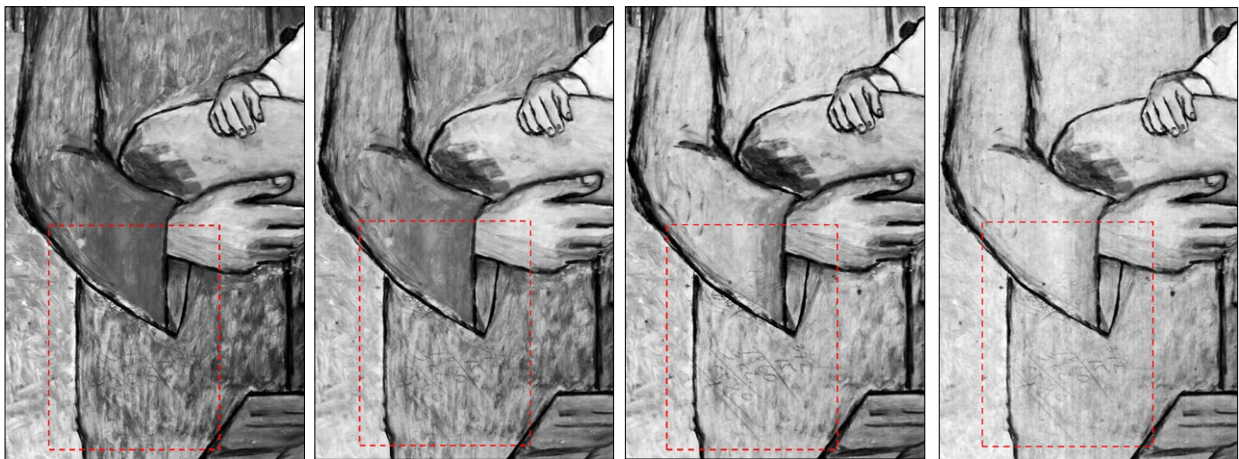
to penetrate the top layers of paintings while analyzing them and assessing the composition below.<sup>2</sup> The examination results in a series of grayscale images compressed into a single file. Analysis of the data requires dedicated software, which also allows us to observe the results in so-called false colors (FC) (Fig. 9).

The very broad capturing range of the hyperspectral camera in The Conservation Emergency Unit (900–2500 nm) enables an unprecedented form of imaging and detection possibilities provided by a single device. According to the available literature, 1330–2200 nm infrared region is indicated as the most interesting for the study of paintings [Falcone et al. 2008, pp. 1708–1716]. It is assumed that in this range individual pigments begin to show complete transparency [Fragasso, Masini 2011, pp. 1–8].

The level of infrared light penetration depends on several factors. The results of infrared reflectography can be affected by: the presence of pigmented grounds (mortars), the optical properties of the materials used in the object, the nature of the materials used in the preparatory drawing, the thickness of the various technological layers, and the general state of preservation of the object under study [Farries 2003, p. 91].

By using the entire range of near- and short-wave infrared, the hyperspectral imaging technique enables to visualize many details impossible to detect in commonly used IR photography. In one of the studied paintings, HSI enabled the precise visualization of the so-called copyist's grid present in the painting, visible





Ryc. 8. Fragment obrazu olejnego na płycie pilśniowej *Święty Józef*, kościół Matki Boskiej Anielskiej w Obrzynowie (gmina Prabuty); wraz ze wzrostem długości fali na kolejnych reflektogramach 1200 nm [a], 1600 nm [b], 1800 nm [c] i 2200 nm [d] ucytelniają się kolejne obszary z cyframi; [a–d] fot. A. Selerowicz.

Fig. 8. Fragment of *St. Joseph*, oil painting on fiberboard, church of Holy Mother of Angels in Obrzynów (Prabuty municipality); as the wavelength increases on successive reflectograms 1200 nm [a], 1600 nm [b], 1800 nm [c] and 2200 nm [d], more areas with figures become distinctive; [a–d] photo by A. Selerowicz.

badań malowideł region promieniowania podczerwonego wskazuje się 1330–2200 nm [Falcone et al. 2008, s. 1708–1716]. Przyjmuje się, że w tym zakresie poszczególne pigmenty zaczynają wykazywać całkowitą transparentność [Fragasso, Masini 2011, s. 1–8].

Stopień przenikania promieniowania podczerwonego zależy od kilku czynników. Na odczyt wyników reflektografii w podczerwieni może mieć wpływ: obecność barwionych gruntów, właściwości optyczne materiałów użytych w obiekcie, charakter materiałów, którymi wykonano rysunek przygotowawczy, grubość poszczególnych warstw technologicznych, ogólny stan zachowania badanego obiektu [Farries 2003, s. 91].

Dzięki wykorzystaniu całego przedziału bliskiej i krótkofalowej podczerwieni technika obrazowania hiperspektralnego pozwala na uwidocznienie wielu detali niemożliwych do wykrycia w powszechnie stosowanej fotografii w IR. W przypadku jednego z badanych obrazów HSI umożliwiło precyzyjne zwizualizowanie tzw. siatki kopisty na obrazie, widocznej jedynie fragmentarycznie w technice fotografii w podczerwieni (ryc. 10). W celu lepszej całościowej oceny efektów analizy hiperspektralnej poszczególne rejestracje złożono mozaikowo w programie graficznym. Na podstawie otrzymanych wyników można dokładnie prześledzić kształt i zakres linii pomocniczych, co wnosi dodatkowe istotne informacje na temat warsztatu artysty.

### Podsumowanie

Obrazowanie hiperspektralne (HSI) stało się w ostatnim czasie niezbędnym narzędziem w dziedzinie badań nad dziełami sztuki, oferując niespotykane dotąd możliwości analizy, dokumentacji i w konsekwencji kompleksowej ochrony dziedzictwa kulturowego. Kamera dostępna w Pogotowiu Konserwatorskim umożliwia rejestrację danych w szerokim zakresie długości fal elektromagnetycznych (900–2500 nm), dostarczając często wie-

only fragmentarily in IR photography (Fig. 10). For a better overall evaluation of the effects of hyperspectral analysis, the individual captured scans were mosaically assembled in a professional software. Based on the results, the shape and extent of the auxiliary lines can be accurately defined, which brings additional important information on the artist's workshop.

### Conclusions

Hyperspectral imaging (HSI) has recently become an indispensable tool in the field of artwork research, offering unprecedented opportunities for analysis, documentation and, consequently, comprehensive protection of cultural heritage. The camera available at The Conservation Emergency Unit allows to record data over a wide range of electromagnetic wavelengths (900–2500 nm), often providing a wealth of information about an object's state of preservation, its technological structure and workmanship. In addition, hyperspectral imaging facilitates monitoring the course of conservation treatment, indirectly pointing conservators to solutions in developing appropriate strategies or selecting effective procedures.

One of the key advantages of HSI is its non-invasive nature, allowing artworks to be analyzed without causing any damage. This is particularly important in the field of restoration, where minimizing the interference with historical substance comes to the fore. The ability to record the data from the entire near-infrared (NIR, SWIR) spectrum further enhances the usefulness of the Headwall camera, enabling detection of compositional details invisible to the naked eye or visualizing details and subtle differences in an artist's technique.

By means of hyperspectral imaging, we obtain a range of complex information. The captured reflectograms are the result of characteristic behavior demonstrated by various materials exposed to infrared radi-





Ryc. 9. Fragment obrazu olejnego na desce *Adoracja Dzieciątko* (krąg Fra Angelico) (druga połowa XV w., Włochy); obiekt z Muzeum Diecezjalnego w Opolu; zestawienie fotografii w świetle widzialnym [a] z reflektogramem w podczerwieni przy długości fali 1800 nm [b] oraz symulacjami w fałszywych kolorach [c, d]; w zależności od wybranej metody wizualizacji wyników badań uczytelniane są różne obszary obiektu; [a] fot. R. Stasiuk, [b, c, d] fot. A. Selerowicz.

Fig. 9. Fragment of *Adoration of the Child*, oil panel painting (Fra Angelico circle) (second half of the fifteenth century, Italy); object from the Diocesan Museum in Opole; comparison between visible-light photography [a] and infrared reflectogram at 1800 nm [b] and false-color simulations [c, d]; depending on the chosen method of visualizing the results, different areas of the object are highlighted; [a] photo by R. Stasiuk, [b, c, d] photo by A. Selerowicz.

lu informacji na temat stanu zachowania obiektu, jego budowy technologicznej i techniki wykonania. Ponadto obrazowanie hyperspektralne ułatwia monitorowanie przebiegu prac konserwatorskich, wskazując pośrednio konserwatorom rozwiązania w opracowywaniu odpowiednich strategii czy doborze skutecznych zabiegów.

Jedną z kluczowych zalet HSI to jego nieinwazyjny charakter, pozwalający na analizę dzieł sztuki bez powodowania jakichkolwiek uszkodzeń. Jest to szczególnie ważne w dziedzinie konserwacji, gdzie ograniczenie ingerencji w materię zabytkową występuje na pierwszy plan. Możliwość rejestracji całego spektrum bliskiej podczerwieni (NIR, SWIR) dodatkowo zwiększa użyteczność kamery Headwall, umożliwiając wykrycie niewidocznych gołym okiem detali kompozycyjnych czy wizualizację szczegółów i subtelnych różnic w technice artysty.

Na drodze obrazowania hyperspektralnego uzyskujemy szereg złożonych informacji. Otrzymane reflektogramy są rezultatem charakterystycznych reakcji różnorodnych materiałów na promieniowanie podczerwone, polegających na jego odbiciu lub roz-

ation, consisting of its reflection or scattering. The effects depend on the optical properties of the individual components of the studied object, but do not necessarily show a cross-section distribution. Evaluating monochromatic scans can be supported by observing the results in individual channels of the RGB (red, green, blue) spatial color model [Vandivere et al. 2019, pp. 7–64], respectively assigned to wavelengths beyond the range of visible radiation. However, it is important to bear in mind caution required when interpreting the results. Unlike the infrared photography technique, HSI does not provide a single flattened image, but to some extent a multidimensional model that consists of a series of captured images assigned to particular wavelengths of the electromagnetic spectrum.

#### Acknowledgements

I would like to thank the owners and possessors of the objects for agreeing to share the results of my hyperspectral imaging research for the purposes of this publication: to Fr. Wojciech Lipka (Director of the Dioce-

proszeni. Efekty zależą od właściwości optycznych poszczególnych składowych badanego obiektu, nie są jednak zapisem w rozumieniu rozkładu stratygraficznego. W odczytywaniu monochromatycznych skanów może pomóc obserwacja wyników w poszczególnych kanałach przestrzennego modelu barw RGB (ang. *red, green, blue*) [Vandivere et al. 2019, s. 7–64], przypisanych odpowiednio długościom fal wykraczającym poza zakres promieniowania widzialnego. Należy jednak pamiętać, aby w trakcie interpretowania wyników badań zachować dużą rozwagę. W odróżnieniu od techniki fotografii w podczerwieni, nie uzyskujemy pojedynczego spłaszczonego obrazu, lecz w pewnym stopniu wielowymiarowy model, na który składa się szereg rejestracji przypisanych poszczególnym długościom fali spektrum elektromagnetycznego.

### Podziękowania

Składam szczególne podziękowania właścicielom i dysponentom obiektów za zgodę na udostępnienie wyników badań hiperspektralnych na cele tej publikacji: ks. Wojciechowi Lipce (Dyrektorowi Muzeum Diecezjalnego w Opolu), ks. Robertowi Gubernatowi (kościół Matki Boskiej Anielskiej w Obrzynowie, gmina Prabuty) i drowi Mateuszowi Jasińskiemu (Wydział Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP w Warszawie). Za udostępnienie dokumentacji fotograficznej w światłach analitycznych VIS, IR, UV dziękuję Romanowi Stasiukowi i drowi Piotrowi Zambrzyckiemu (Laboratorium Fotografii Dokumentacyjnej ASP w Warszawie).

Ryc. 10. *Przemienienie Pańskie*, olej na płótnie, J. Buchbinder; zadanie badawcze dra Mateusza Jasińskiego „Zastosowanie innowacyjnych środków w dokumentacji, badaniach i konserwacji obiektów zabytkowych – Badania technologiczne obrazów Józefa Buchbindera (1839–1909)”; porównanie efektów fotografii w podczerwieni [a] z obrazowaniem hiperspektralnym HSI [b]; [a] fot. R. Stasiuk, [b] fot. A. Selerowicz.

Fig. 10. *Transfiguration of Our Lord*, oil on canvas, J. Buchbinder; research project by Mateusz Jasiński, Ph.D., „Zastosowanie innowacyjnych środków w dokumentacji, badaniach i konserwacji obiektów zabytkowych – Badania technologiczne obrazów Józefa Buchbindera (1839–1909);” comparison of the results of infrared photography [a] with hyperspectral imaging [b]; [a] photo by R. Stasiuk, [b] photo by A. Selerowicz.

san Museum in Opole), Fr. Robert Gubernat (Church of Holy Mother of Angels in Obrzynów, Prabuty municipality) and Mateusz Jasiński, Ph.D. (Department of Conservation and Restoration of Works of Art, Academy of Fine Arts in Warsaw). For providing photographic documentation in VIS, IR, UV analytical lights, I would like to thank Roman Stasiuk and Piotr Zambrzycki, Ph.D. (Laboratory of Documentary Photography, Academy of Fine Arts in Warsaw).



<sup>1</sup> Czytelność wyników uzależniona jest m.in. od zastosowanych w obiekcie materiałów czy grubości poszczególnych warstw.

<sup>2</sup> Stopień przenikania promieniowania podczerwonego zależy od różnych czynników, m.in. grubości warstw malarskich czy właściwości optycznych użytych w obiekcie materiałów.

### Bibliografia / References

**Opracowania / Secondary sources**  
Cucci Constanza, Casini Andrea, *Hyperspectral imaging for artworks investigation*, [w:] *Hyperspectral Imaging*, t. 32, red. Jose Manuel Amigo, Amsterdam 2019.

Falcone Lidia, Bloisi Francesco, Califano Valeria, Paganò Marco, Vicari Luciano R.M., *An old notice board at ancient Herculaneum studied using Near Infrared Reflectography*, „Journal of Archeological Science” 2008, t. 35.



- Farries Molly, *Techniques and Applications – Analytical capabilities of Infrared reflectography: An Art Historian's Perspective*, [w:] *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis*, Washington D.C. 2003.
- Fragasso Laura, Masini Nicola, *Postprocessing of Infrared Reflectography to Support the Study of a Painting: The Case of Vivarini's Polyptych*, „International Journal of Geophysics” 2011, t. 2011.
- Goetz Alexander F.H., Vane Gregg, Solomon Jerry E., Rock Barrett N., *Imaging spectrometry for Earth remote sensing*, „Science” 1985, t. 228, nr 4704.
- Saunders David, Burmester Andreas, Cupitt John, Raffelt Lars, *Recent applications of digital imaging in painting conservation: transportation, colour change and infrared reflectographic studies*, *Tradition and Innovation: Advances in Conservation*, „Studies in Conservation” 2000, t. 45, dod. 1.
- Vandivere Abbie, van Loon Annelies, Dooley Kathryn A., Haswell Ralph, *Revealing the painterly technique beneath the surface of Vermeer's Girl with a Pearl Earring using macro- and microscale imaging*, „Heritage Science” 2019, t. 7, nr 64.

#### Źródła elektroniczne / Electronic sources

- Hyperspectral at Scale*, [www.headwallphotonics.com](http://www.headwallphotonics.com) (dostęp: 21 VI 2021).
- Introduction to Infrared Reflectography*, <https://www.opu-sinstruments.com/infrared-reflectography/> (dostęp: 11 IV 2021).
- What is SWIR?*, <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/> (dostęp: 10 X 2024).

---

## Streszczenie

Obrazowanie hiperspektralne (HSI) zyskuje coraz szersze grono zwolenników wśród badaczy dzieł sztuki i konserwatorów zabytków jako nieniszcząca metoda dostarczająca cennych informacji na temat analizowanego obiektu. Dzięki wykorzystaniu obszernego przedziału spektrum elektromagnetycznego w zakresie bliskiej podczerwieni (900–2500 nm) kamera hiperspektralna dostępna w Pogotowiu Konserwatorskim pozwala często na odkrycie i ucytelnienie wielu szczegółów, w tym obecności rysunku przygotowawczego ukrytego pod warstwą malarską, autorskich zmian kompozycyjnych czy obszarów objętych późniejszymi ingerencjami (np. konserwatorskimi). Artykuł ma na celu przybliżenie działania techniki obrazowania hiperspektralnego, przedstawienie zalet HSI w kontekście analizy dzieł sztuki na przykładach malarstwa na podłożach płóciennych i drewnianych, a także pokazanie potencjału tej metody w dostarczaniu informacji o obiektach zabytkowych niedostępnych na drodze innych, powszechnie stosowanych dotychczas badań.

## Abstract

Hyperspectral imaging (HSI) is gaining a growing group of supporters among art researchers and conservators as a non-destructive method that provides valuable information about the examined object. Thanks to the use of a wide range of the electromagnetic spectrum in the near-infrared range (900–2500 nm), the hyperspectral camera available at The Conservation Emergency Unit often allows the discovery and authentication of many details, including the presence of a preparatory drawing hidden under the paint layers, original compositional changes or areas subjected to later interventions (e.g., conservation treatments). The article aims to introduce the modus operandi of the hyperspectral imaging technique, to present the advantages of HSI in the context of the analysis of works of art using case studies of paintings on canvas and wooden panels, and to demonstrate the potential of this method in providing information about historical objects inaccessible through other analytical methods commonly used so far.